A.J. Gaston
G.E.J. Smith

Interprétation des relevés aériens d'oiseaux de mer : certains effets du comportement

Environnement Canada
Service canadien de la faune

Environment Canada
Canadian Wildlife Service

A.J. Gaston*
G.E.J. Smith†

Interprétation des relevés aériens d'oiseaux de mer : certains effets du comportement

Publication hors série
Numéro 53
Service canadien de la faune

Also available in English

*SCF, Ottawa (Ont.) K1A 0E7.
†SCF, Delta (C.-B.) V4K 3Y3.

Publication autorisée par le
Ministre de l'Environnement
Service canadien de la faune

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1984
N° de catalogue CW69-1/53F
ISBN 0-662-92648
ISSN 00576-6370

Conception graphique : Rolf Harder & Assoc.

Table des matières

4	Remerciements
4	**Résumé**
5	**Introduction**
6	**Méthodes**
6	1. Fréquentation de la colonie
7	2. Durée des déplacements entre la colonie et l'aire d'alimentation
9	3. Mouvement relatif des oiseaux et de l'aéronef
12	4. Durée et fréquence des plongeons
13	5. Degré de rassemblement
14	**Analyse**
15	**Annexes**
18	**Bibliographie**

Liste des tableaux

5	Tableau 1. Sources de biais et d'inexactitudes dans les relevés aériens d'oiseaux de mer, découlant du comportement des oiseaux

Liste des figures

6	Figure 1. Proportion approximative de la population reproductrice en mer à différentes étapes du cycle de reproduction du Fulmar boréal, du Macareux moine et de la Marmette de Brünnich
8	Figure 2. Durée totale des déplacements et rapport entre les oiseaux qui utilisent réellement une zone particulière et ceux qui y sont présents, à un moment donné, en fonction de la distance de la colonie
8	Figure 3. Correction indiquée dans l'équation [3] et appliquée aux données recueillies par relevé aérien sur la Marmette de Brünnich près du détroit de Digges, le 9 août 1981
8	Figure 4. Illustration des paramètres utilisés dans les équations [6] et [7]
9	Figure 5. Exemple de la correction indiquée dans les équations [6] et [7], d'après des données sur la Marmette de Brünnich recueillies au large de l'île de Hantzsch, au sud-est de l'île de Baffin
9	Figure 6. Exemple d'une correction basée sur l'annexe 1 pour une zone d'alimentation d'un rayon de 100 km
10	Figure 7. Diagramme illustrant les paramètres analysés à la section 3
10	Figure 8. Relation entre les fréquences de passage observées et réelles, calculée à l'aide des équations [4] et [5] pour différentes vitesses des oiseaux et de l'aéronef par rapport à l'angle θ°
11	Figure 9. Relation entre les fréquences de passage observées et réelles, calculée pour la figure 7, en supposant que la vision à l'avant est égale à la largeur du transect
13	Figure 10. Intensité de relevé nécessaire pour obtenir un coefficient donné de variation pour une évaluation de la population, par rapport à la taille de la volée
13	Figure 11. Guide de fiabilité des évaluations effectuées à partir de relevés aériens par rapport à la population totale et aux volées moyennes

Liste des annexes

15	Annexe 1. Méthode utilisée pour corriger les densités observées afin de compenser les variations des durées de déplacement
16	Annexe 2. Correction pour compenser le déplacement relatif des oiseaux et de l'aéronef
16	1. Dérivation de l'équation pour la fréquence de déplacement d'après des observations effectuées à bord d'un aéronef
17	2. Absence de correction en fonction du déplacement des oiseaux en vol au cours de relevés aériens
17	Annexe 3. Dérivation des rapports entre la taille de la volée, la population totale et le degré de précision obtenu pour une partie donnée de la zone étudiée

Remerciements

Nous tenons à remercier Hugh Boyd, Brian Collins, George Finney et Steve Wendt pour leurs commentaires sur les premières versions du présent document. Les figures ont été fournies par la Section du dessin d'Environnement Canada.

Résumé

Les relevés aériens ont été fréquemment utilisés pour observer au large la répartition et l'abondance des oiseaux de mer. Bien que les biais systématiques dus aux conditions météorologiques et marines, au type d'aéronef ainsi qu'à l'expérience de l'observateur et aux conditions de l'observation aient été analysés par d'autres auteurs, l'interprétation de l'effet des variables biologiques inhérentes au comportement des oiseaux a été pratiquement ignorée.

Le présent document examine cinq modes d'analyse des données recueillies par relevés aériens qui, comparativement à un bref examen des données brutes, permettront d'approfondir notre compréhension de la répartition des oiseaux de mer. Nous étudions les effets : 1) de la fréquentation de la colonie, 2) de la durée des déplacements entre la colonie et les zones d'alimentation, 3) du déplacement relatif des oiseaux et de l'aéronef, et 4) de la durée et de la fréquence des plongeons. Nous examinons également l'effet de la taille de la volée sur la précision des résultats du relevé et la représentativité de l'échantillonnage.

Le document présente des exemples qui illustrent dans quelle mesure les corrections proposées peuvent améliorer l'interprétation des résultats.

Introduction

Les relevés aériens ont été fréquemment utilisés pour étudier la répartition, au large, des oiseaux de mer et des mammifères marins dans les eaux de l'est du Canada. Ces relevés visent à déterminer l'importance relative des différentes régions pour les oiseaux de mer, et se fondent sur l'hypothèse selon laquelle ces connaissances serviront à la planification et à la mise en œuvre des activités hauturières d'exploration, d'extraction et de transport maritime des hydrocarbures.

Lors de l'examen des résultats de relevés aériens, qui doivent servir aux évaluations des incidences environnementales, on accorde nécessairement la priorité aux secteurs où les oiseaux se nourrissent ou sont, pour une raison quelconque, en contact avec la surface de la mer. Cela est également vrai si l'on désire analyser l'importance biologique des répartitions observées. Il est donc nécessaire dans certains cas de séparer les données sur les oiseaux en vol de celles sur les individus à la surface de l'eau et c'est l'examen de ces dernières qui nous intéresse particulièrement ici.

Les biais et les inexactitudes possibles liés aux relevés aériens ont fait l'objet de nombreuses études (Johnson *et al.*, inédit; MacLaren Marex, inédit; Nettleship et Gaston, 1978; McLaren, 1982; Savard, 1982; Orr et Ward, 1982; Harrison, 1982); toutefois, il n'existe aucune donnée quantitative sur leur importance. En conséquence, la plupart des études sur le sujet sont de nature qualitative. Les problèmes perçus se répartissent en quatre catégories :

1) les effets des conditions météorologiques, de l'éclairement et de l'état de la mer sur le repérage des oiseaux de mer;
2) le repérage relatif des différentes espèces d'oiseaux de mer en fonction de leur taille, leur plumage, leur comportement et leur degré de rassemblement;
3) les effets liés à l'observateur, notamment sa position assise, son expérience et sa fatigue;
4) les effets des caractéristiques de l'aéronef sur le champ de vision des observateurs ainsi que les effets de la vitesse et de l'altitude sur la capacité des observateurs à déceler la présence d'oiseaux de mer.

Tous les facteurs susmentionnés ont un effet sur la probabilité de repérage et de numération précise des oiseaux. Cependant, même si les dénombrements étaient effectués avec une précision de 100 % ou que le degré de biais était calculé avec une grande précision, l'interprétation des différences dans le nombre d'oiseaux observés dans différentes zones ou à diverses époques varierait en raison du comportement des oiseaux. Cela est particulièrement vrai pendant la saison de la reproduction. Certains effets peuvent être prévus d'après les études de comportement menées dans des colonies de reproduction ou en mer, et dans le présent document, nous tenterons d'explorer quelques-uns de ces problèmes et d'en évaluer l'importance.

Nous traiterons des sources de biais et d'inexactitudes sous cinq aspects (tableau 1). Certaines de ces sources peuvent être déterminées et corrigées dans des situations particulières (1, 2, 3), certaines peuvent être évaluées par des recherches additionnelles (4), et d'autres peuvent être minimisées lors de la conception initiale du relevé (1, 5). Les facteurs correctifs obtenus pour certaines sources de biais sont applicables aux observations effectuées à bord de bateaux ainsi qu'aux relevés aériens.

Tableau 1
Sources de biais et d'inexactitudes dans les relevés aériens d'oiseaux de mer, découlant du comportement des oiseaux

Source	Espèce concernée	Saison
1. Présence à la colonie	Tous les oiseaux de mer	Saison de reproduction à compter de 1 à 2 mois avant la ponte
2. Durées de déplacement entre les colonies et les zones d'alimentation	Oiseaux qui quêtent leur nourriture à de grandes distances; fulmars, pétrels, Fous de Bassan, mouettes, alcidés	Saison de reproduction à compter de 1 à 2 mois avant la ponte
3. Mouvement relatif des oiseaux et de l'aéronef	Tous les oiseaux de mer, mais particulièrement les voiliers rapides; alcidés, puffins	Saison de reproduction et périodes de migration
4. Durée et fréquence des plongeons	Nageurs sous l'eau; cormorans, alcidés, puffins	Toutes les saisons
5. Degré de rassemblement	Oiseaux qui s'alimentent en volées; fulmars, puffins, goélands, mouettes	Variable

Méthodes

1. Fréquentation de la colonie

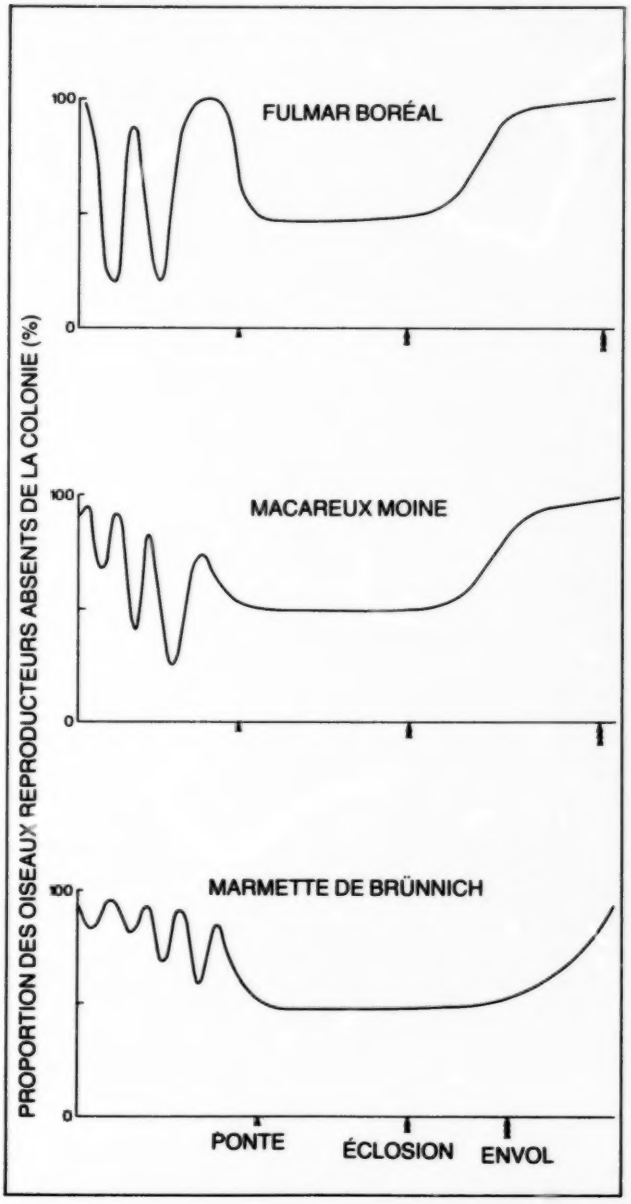
Les observateurs qui effectuent des relevés aériens évitent habituellement le voisinage immédiat des grandes colonies d'oiseaux de mer afin de minimiser les perturbations. En conséquence, les oiseaux qui fréquentent la colonie sont exclus des effectifs échantillonnés pendant la plupart des relevés aériens. Le nombre d'oiseaux observés en mer est donc inversement proportionnel au nombre d'oiseaux présents dans la colonie. Gaston et Nettleship (1983) ont démontré cette relation inverse dans une étude sur la Marmette de Brünnich (*Uria lomvia*) de la colonie de l'île du Prince-Léopold.

Pour la plupart des oiseaux de mer, au moins la moitié de la population est présente dans la colonie à un moment donné, à partir de la date médiane de la ponte jusqu'à la date médiane de l'éclosion au moins, et, dans certains cas, plus longtemps. Le nombre d'oiseaux présents avant la ponte varie considérablement, parfois de manière cyclique [le Fulmar boréal (*Fulmarus glacialis*), Greene et Nettleship, inédit; le Macareux moine (*Fratercula arctica*), Nettleship, 1972; le Gode (*Alca torda*), Lloyd, 1975; la Marmette commune (*Uria aalge*), Birkhead, 1978], parfois de façon irrégulière, selon les conditions météorologiques [la Marmette commune (un an), Birkhead, 1978; la Marmette de Brünnich, Gaston et Nettleship, 1983].

Les régimes diurnes de fréquentation peuvent également influer sur le nombre d'oiseaux absents de la colonie. Ces régimes peuvent suivre un cycle solaire, comme c'est le cas pour la plupart des populations de marmettes (Birkhead, 1978; Gaston et Nettleship, 1983), ou un cycle de marée, comme c'est le cas pour au moins une population de Marmettes communes (Slater, 1976).

L'importance des effets de la fréquentation d'une colonie sur le nombre d'oiseaux observés en mer peut être évaluée en comparant la proportion de la population des différentes espèces d'oiseaux présentes dans la colonie et les stades du cycle de reproduction. Chez la plupart des alcidés et chez le Fulmar boréal, le nombre d'individus fréquentant la colonie au cours de la période de préponte varie de zéro à plus de la moitié de la population reproductrice de sorte que, en mer, le nombre maximal d'individus atteint au moins deux fois le nombre minimal. Pendant la période d'incubation, presque tous les oiseaux couvent leurs œufs de façon continue de sorte qu'au moins la moitié de la population est présente à la colonie au cours de cette période. La fréquentation diminue en général au cours de la période d'élevage des jeunes à mesure que ceux-ci vieillissent, à l'exception des marmettes et du Fou de Bassan (*Sula bassana*) : un parent demeure avec le jeune jusqu'à ce qu'il quitte le nid. La figure 1

Figure 1
Proportion approximative de la population reproductrice en mer à différentes étapes du cycle de reproduction pour trois espèces : Fulmar boréal (*Fulmarus glacialis*), Macareux moine (*Fratercula arctica*), et Marmette de Brünnich (*Uria lomvia*)



présente un résumé des variations saisonnières de la proportion de la population absente de la colonie.

L'interprétation des résultats de relevés aériens d'espèces qui présentent des périodes synchronisées de fréquentation de leur colonie de reproduction pendant la période de préponte est très difficile, à moins de pouvoir effectuer des observations simultanées à la colonie. Étant donné que de telles observations sont généralement impossibles dans la pratique, les relevés effectués pendant la période de préponte doivent être interprétés avec prudence.

Johnson *et al.* (inédit) ont présenté des données qui indiquent dans une certaine mesure comment les régimes de fréquentation peuvent influer sur l'interprétation des résultats des relevés. Lors de relevés hebdomadaires dans l'est du détroit de Lancaster, ils ont dénombré environ 20 000 Fulmars boréaux sur des transects survolés à la fin de juin et au début de juillet 1976. Lors de relevés subséquents, effectués au cours de la première partie d'août, de 27 000 à 40 000 Fulmars boréaux ont été observés. Si nous en avions conclu à une augmentation de l'importance de l'est du détroit de Lancaster comme aire d'alimentation, nous aurions probablement été dans l'erreur. Nous savons qu'en 1976, les fulmars ont éclos vers la fin de juillet dans la région du détroit de Lancaster (Nettleship, 1977). Donc, l'augmentation du nombre d'oiseaux en mer était presque égale à celle prévue, une fois la couvaison des petits terminée et les parents absents de la colonie la plupart du temps. En conséquence, nous pouvons conclure que le nombre de Fulmars boréaux se nourrissant dans l'est du détroit de Lancaster est demeuré stable pendant la période en question.

Les variations diurnes du nombre d'oiseaux qui fréquentent leur colonie de reproduction peuvent être considérables et l'importance de ces écarts varie avec le cycle de reproduction. Théoriquement, les relevés devraient être répétés et exécutés aléatoirement quant à l'heure de la journée ou lorsque la plupart des oiseaux sont en mer, mais dans la pratique, cette approche pourrait se révéler trop coûteuse. Dans le cas du Guillemot noir (*Cepphus grylle*), une espèce dont la fréquentation peut varier de zéro à presque 100 % pendant une période de 24 h (Petersen, 1981; AJG, observation personnelle), il est probablement important de ne comparer que des relevés effectués aux mêmes heures du jour ou, lorsqu'il s'agit de régions de latitudes différentes, à des intensités d'éclairement identiques. À l'heure actuelle, la plupart des relevés sont habituellement effectués au milieu de la journée, quand la majorité des Guillemots noirs sont absents de la colonie, car les guillemots ne représentent qu'une espèce parmi celles qui sont étudiées. En conséquence, la plupart des relevés aériens ont lieu lorsque la majorité des guillemots sont absents de la colonie.

2. Durée des déplacements entre la colonie et l'aire d'alimentation

Au cours de la saison de reproduction, et particulièrement pendant l'incubation et l'élevage des jeunes, les oiseaux de mer doivent faire la navette entre leur colonie et leurs aires d'alimentation. Les territoires d'alimentation, les vitesses de vol et la fréquence des visites à la colonie déterminent le temps passé en vol et limitent donc la période réservée à l'alimentation. Pour une espèce donnée, la durée des déplacements est directement proportionnelle à la distance séparant la colonie du territoire d'alimentation. Si nous supposons que tous les oiseaux reproducteurs qui se nourrissent à l'intérieur du territoire d'alimentation des colonies réussissent de façon équivalente à nourrir leurs jeunes, il s'ensuit que les oiseaux qui s'alimentent près de la colonie disposent de plus de temps pour se nourrir que ceux qui voyagent plus loin pour satisfaire le même besoin et qui, par conséquent, consacrent une plus grande partie de leur temps à se déplacer. Les numérations effectuées à une grande distance de la colonie sous-évalueront par conséquent le nombre d'oiseaux utilisant le secteur pour s'alimenter parce qu'un pourcentage élevé de ces derniers seront en transit au moment du relevé. Par contre, les numérations qui incluent les oiseaux en vol auront tendance à exagérer l'importance des zones près de la colonie puisque de nombreux oiseaux les survolent en route vers des aires d'alimentation plus éloignées.

Lors d'observations d'oiseaux de mer qui plongent dans l'eau pour se nourrir, comme les Fous de Bassan, les sternes (*Sterna* spp.) et, dans certains cas, les macareux (*Puffinus* spp.), ou qui recueillent leur nourriture à la surface de l'eau sans s'y poser, comme les pétrels (*Oceanodroma* spp.), il est difficile de distinguer les oiseaux qui s'alimentent de ceux qui se rendent à leur aire d'alimentation ou qui en reviennent. Lors d'observations d'oiseaux qui se posent sur l'eau avant de s'alimenter, il est utile de noter séparément les oiseaux aperçus en vol afin de mieux évaluer l'importance relative des diverses aires d'alimentation.

Le temps consacré aux déplacements entre les aires de reproduction et les aires d'alimentation est exprimé par l'équation générale suivante :

$$T_a = 2VL/s \qquad [1]$$

où T_a = temps de vol ($h \cdot jour^{-1}$); V = nombre de visites quotidiennes à la colonie par chaque parent; L = distance entre la colonie et l'aire d'alimentation (km); s = vitesse de vol ($km \cdot h^{-1}$).

Le biais introduit par le temps consacré aux déplacements peut être évalué dans deux cas : *a*) quand les relevés d'oiseaux dans l'eau sont distincts des relevés d'individus dans les airs, *b*) quand aucune distinction n'est faite.

a) Afin de corriger le nombre d'oiseaux observés en train de se nourrir (N_a) de façon qu'il représente le nombre total d'individus utilisant un secteur au cours d'une journée, il faut ajouter les oiseaux en vol à un moment donné (N_a), ainsi que les oiseaux de la colonie, qui ont déjà utilisé la zone ou qui vont le faire (N_b). Chez les espèces où les deux parents se partagent également les tâches d'incubation, la proportion des reproducteurs en vol à un moment donné est la même que la portion de la journée consacrée au vol par chaque individu.

$$N_a/(N_a + N_a + N_b) = VL/12s = \frac{T_a}{24} \qquad [2]$$

Si nous supposons que le temps passé hors de la colonie est consacré exclusivement aux déplacements (T_a) et à l'alimentation (T_a), la période moyenne d'alimentation sera la suivante :

$$T_a = 24 - T_b - T_a = 24 - T_b - \frac{2VL}{s} \qquad [3]$$

À partir de ce qui précède, il est possible d'obtenir une formule générale pour déterminer le nombre d'oiseaux qui utilisent une zone donnée au cours d'une période de 24 h (N_f) :

$$N_f = N_a/[1 - \frac{T_b}{24} - \frac{VL}{12s}] \qquad [4]$$

Figure 2
Durée totale des déplacements (T_n, ligne pleine) et rapport entre les oiseaux qui utilisent réellement une zone particulière et ceux qui y sont présents, à un moment donné (N_f/N_n, ligne en tirets), en fonction de la distance de la colonie (d'après l'équation [3] en utilisant $V = 2$, $S = 60$ km·h^{-1})

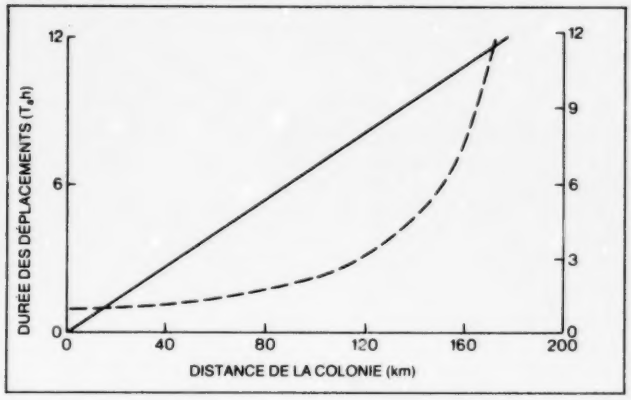


Figure 3
Correction indiquée dans l'équation [3] et appliquée aux données recueillies par relevé aérien sur la Marmette de Brünnich (*Uria lomvia*) près du détroit de Digges, dans le nord-est de la baie d'Hudson, le 9 août 1981 ($V = 1$, $S = 53$ km·h^{-1}). Observations originales : ligne en tirets; données corrigées : ligne pleine

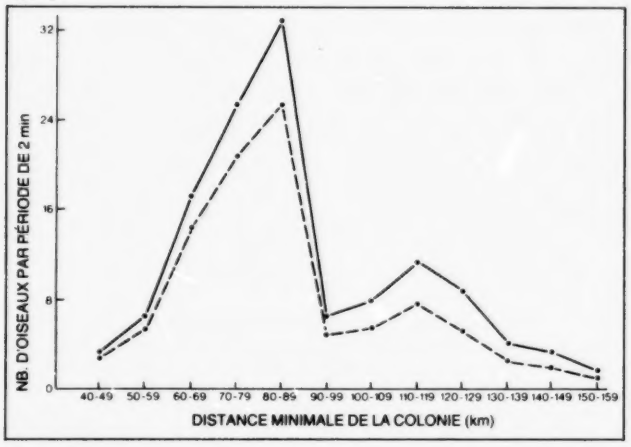
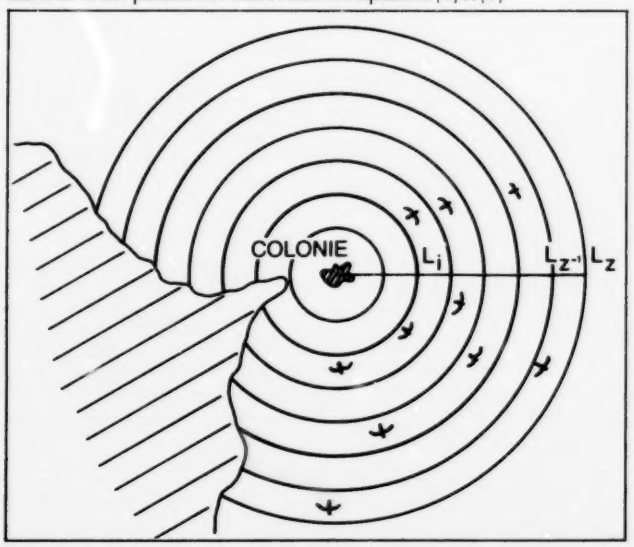


Figure 4
Illustration des paramètres utilisés dans les équations [6] et [7]



Dans le cas le plus simple, qui suppose une relève rapide entre les deux individus qui se partagent les tâches d'incubation et d'élevage, et le départ immédiat du partenaire libéré de ses tâches, cette formule est réduite à :

$$N_f = 2N_n/[1 - \frac{VL}{6s}] \qquad [5]$$

Dans les deux cas, si T_b est connu d'après des observations effectuées à la colonie en question ou pour l'espèce en général, il est possible d'évaluer N_f.

La figure 2 montre la relation entre le nombre d'oiseaux observés (N_n) et le nombre total d'individus qui utilisent un secteur donné (N_f). D'après la figure, la grandeur de l'erreur augmente proportionnellement avec la période de vol (T_n). En conséquence, la correction est relativement négligeable pour des distances jusqu'à 40 km de la colonie, mais devient très significative au-delà de 100 km. La figure 3 illustre une distribution des aires d'alimentation, corrigée de cette façon, d'après des observations effectuées dans le voisinage des grandes colonies de Marmettes de Brünnich du détroit de Digges.

(*b*) Si les numérations réalisées au cours de relevés ne font pas la distinction entre les oiseaux en vol et ceux sur l'eau, ou si les oiseaux observés s'alimentent surtout en vol, les numérations effectuées près de la colonie seront faussées par l'inclusion d'oiseaux qui font route vers des secteurs éloignés ou qui en reviennent. Si les oiseaux en vol ne forment pas des concentrations qui suivent les rivages, les densités d'oiseaux observées à différentes distances des colonies peuvent être corrigées pour donner une évaluation de la proportion réelle de la population qui s'alimente à diverses distances.

Cette correction est effectuée en divisant la région qui entoure la colonie en zones concentriques (figure 4) et en utilisant le nombre d'oiseaux observés dans la zone la plus éloignée pour évaluer le nombre réel d'individus qui se nourrissent dans cette zone au moment du relevé. La proportion de la colonie qui s'alimente dans chaque zone peut ensuite être évaluée, de la zone la plus extérieure vers l'intérieur, en calculant le nombre d'oiseaux qui traversent chaque zone en route vers des zones plus éloignées ou lors du retour. Comme dans l'exemple précédent, la méthode exige une connaissance de la vitesse de vol, du nombre de visites quotidiennes à la colonie, et de la période consacrée quotidiennement à l'alimentation par chaque oiseau reproducteur.

Pour calculer le nombre total d'oiseaux qui utilisent la zone limite extérieure (z) pour s'alimenter, on emploie une forme modifiée de l'équation [4] :

$$N_{fz} = \frac{24n_{oz}}{24 - T_b - (2VL_{z-1})/s} \qquad [6]$$

où N_{fz} et n_{oz} sont respectivement le nombre total et le nombre observé d'oiseaux qui s'alimentent dans la zone limite.

En travaillant vers l'intérieur à partir de la zone limite, nous calculons le nombre d'oiseaux qui s'alimentent dans chaque zone successive (N_{fi}) :

$$N_{fi} = \frac{24sn_{oi} - [2V(L_i - L_{i-1}) \sum_{j=i+1}^{z} N_{fj}]}{(24 - T_b)s - 2VL_{i-1}} \qquad [7]$$

où i = zone limite intérieure
$z-1$ = zone voisine de la zone limite extérieure
z = zone limite extérieure
j = $i+1$ = zone voisine de la zone limite intérieure

et où n_{ij} est le nombre moyen d'oiseaux observés pendant leur période d'alimentation dans la zone limite intérieure (i) ou survolant celle-ci. La dérivation de cette formule figure à l'annexe 1. (Notez que dans le cas de la zone voisine de la zone limite extérieure ($z-1$), $\Sigma N_{fj} = N_{fz}$.)

La figure 5 illustre l'utilisation de cette technique d'après des données obtenues lors d'un relevé effectué par bateau dans le voisinage de la colonie de Marmettes de Brünnich à l'île de Hantzsch (MacLaren Marex, inédit). La ligne en tirets montre la densité «réelle» estimative des oiseaux en période d'alimentation, d'après les densités de tous les oiseaux observés (ligne pleine supérieure). La ligne pleine inférieure indique les densités d'oiseaux observés sur l'eau seulement, vraisemblablement les individus qui sont réellement en train de s'alimenter. La ligne estimative (en tirets) illustre mieux la situation réelle que les données basées sur toutes les observations.

Comme les autres corrections pour la période de vol, cette correction augmente avec l'éloignement de la zone d'alimentation. La figure 6 montre un exemple hypothétique, basé sur les valeurs appropriées pour la Marmette de Brünnich : une zone d'alimentation à une distance maximale de 100 km, une vitesse de vol de 58 km·h^{-1}, et deux voyages à la colonie chaque jour. Cet exemple illustre la différence radicale entre les densités observées et le pourcentage réel d'oiseaux qui s'alimentent à diverses distances de la colonie. Ce type de correction est particulièrement important pour des espèces comme les pétrels, les fulmars et les Fous de Bassan qui cherchent leur proie en vol et passent très peu de temps dans l'eau ou à sa surface.

3. Mouvement relatif des oiseaux et de l'aéronef

Les oiseaux observés en vol au cours des relevés aériens voyagent parfois dans la même direction, comme c'est le cas lorsqu'ils se déplacent entre leur colonie et une zone d'alimentation restreinte, ou qu'ils migrent. Afin d'évaluer l'intensité réelle de passage, il faut corriger les intensités observées de mouvement pour compenser la vitesse relative des oiseaux et de l'aéronef.

Dans la plupart des relevés aériens, l'aéronef vole plus vite que les oiseaux d'un facteur de 2 à 4 fois. Si l'aéronef voyageait à une vitesse très supérieure à celle des oiseaux (>10 fois plus vite), ces derniers seraient stationnaires par rapport à l'observateur. Inversement, une plateforme d'observation qui se déplacerait beaucoup plus lentement que les oiseaux (une embarcation à vitesse très faible) serait stationnaire par rapport aux oiseaux. Une correction pour compenser la vitesse relative est souhaitable lorsque la vitesse des oiseaux et celle de l'observateur ne diffèrent pas d'un facteur supérieur à 5.

Pour cette correction, nous supposons l'existence d'un kilomètre carré d'océan que traversent les oiseaux en vol dans une direction précise. Si les oiseaux volent à une vitesse moyenne de s km·h^{-1}, et que la densité des oiseaux à un instant donné est D oiseaux·km^{-2}, il est possible d'évaluer l'intensité de passage (e oiseaux·km^{-1}·h^{-1}).

Chaque oiseau demeure s^{-1}h dans le carré. Donc, pour que D oiseaux s'y maintiennent, D individus doivent y entrer chaque s^{-1}h. En conséquence :

$$e = D/s^{-1} = Ds \qquad [8]$$

Si s est une constante connue pour l'espèce concernée, il est possible de trouver e en évaluant D. Étant donné ces condi-

Figure 5
Exemple de la correction indiquée dans les équations [6] et [7], d'après des données sur la Marmette de Brünnich (*Uria lomvia*) recueillies au large de l'île de Hantzsch, au sud-est de l'île de Baffin (MacLaren Marex, inédit). La ligne en tirets représente la proportion estimative d'oiseaux en train de s'alimenter, la ligne pleine supérieure indiquant toutes les observations. La ligne pleine inférieure montre les numérations réelles d'oiseaux posés sur l'eau, qui sont probablement en train de s'alimenter. La zone limite extérieure d'alimentation a été établie hypothétiquement à 40–50 kilomètres de la colonie, car le nombre d'individus observés au-delà de 50 km était très réduit

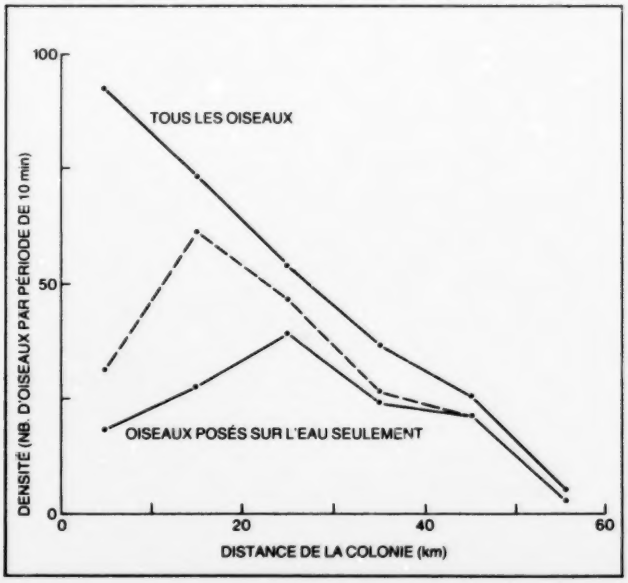


Figure 6
Exemple d'une correction basée sur l'annexe 1 pour une zone d'alimentation d'un rayon de 100 km. La ligne pleine indique les densités observées. L'histogramme montre les proportions calculées de la population qui se nourrissent dans chaque zone

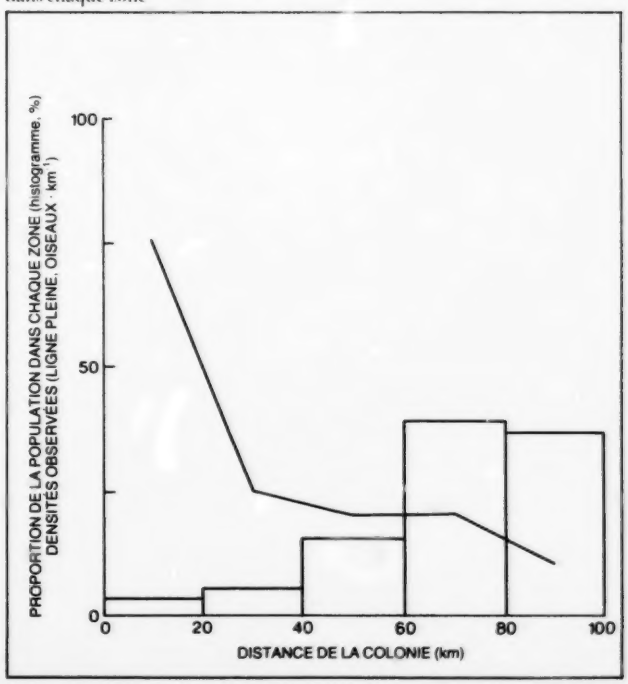


Figure 7
Diagramme illustrant les paramètres traités à la section 3

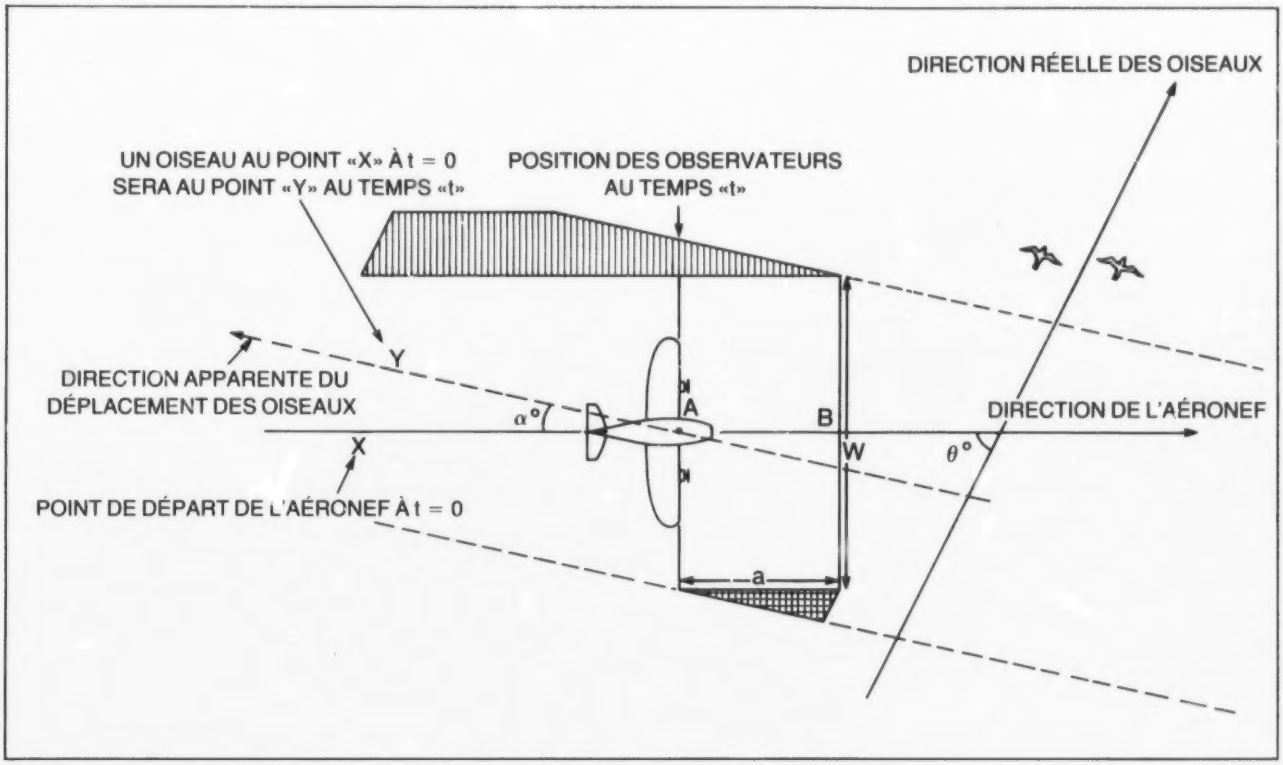
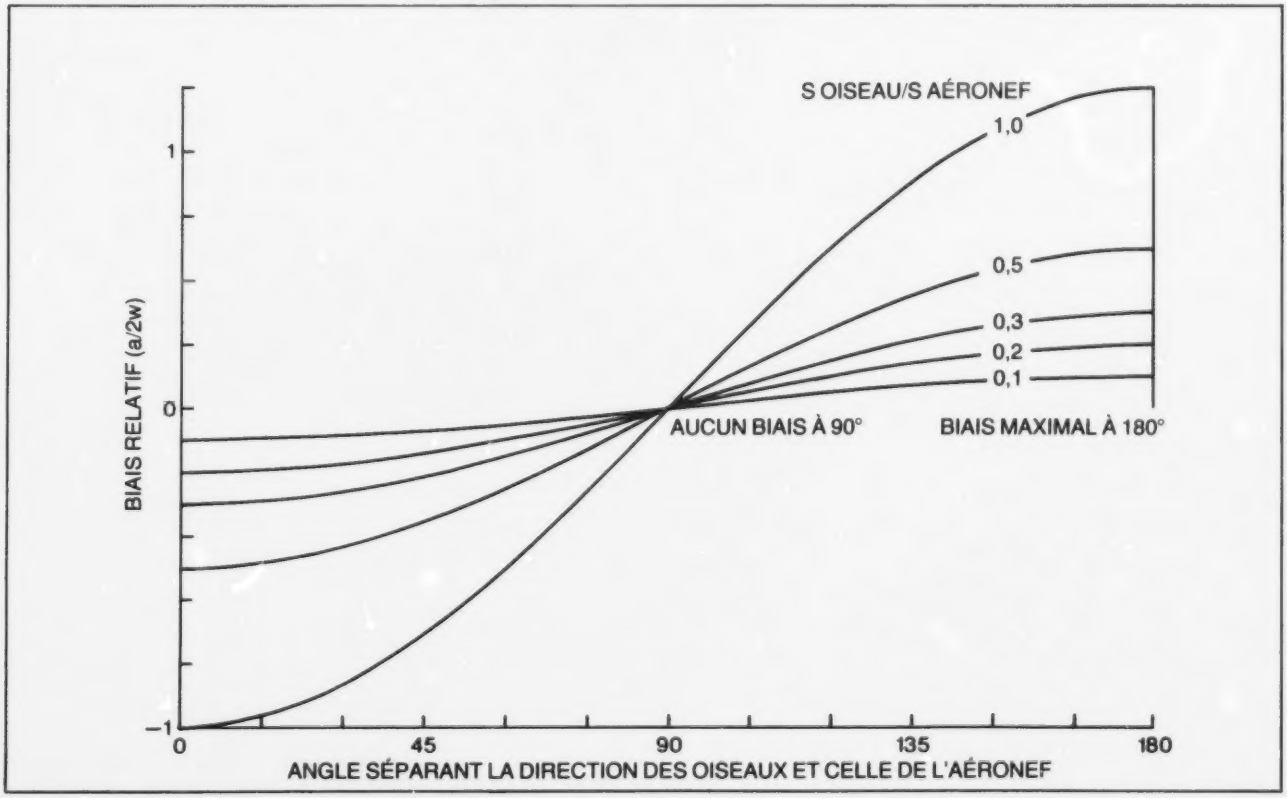


Figure 8
Relation entre les fréquences de passage observées et réelles (e_o / e_r), calculées à l'aide des équations [4] et [5] pour différentes vitesses des oiseaux et de l'aéronef par rapport à l'angle θ°. La vision à l'avant est négligeable



tions, une correction pour compenser la vitesse relative est nécessaire.

Considérons maintenant la situation de la figure 7 où les directions de vol de l'oiseau et de l'aéronef forment un angle θ°. Si $\theta° < 90°$, le nombre d'oiseaux comptés sur une distance donnée, à l'intérieur d'un transect de largeur fixe, sera inférieur au nombre d'individus réellement présents dans le secteur observé à un moment donné. Il est possible d'expliquer le phénomène par le fait que la composante directionnelle qui les amène à se déplacer dans la même direction que l'aéronef signifie que certains oiseaux quitteront le transect avant d'être comptés. Inversement, si $\theta° > 90°$, le contraire est vrai, et le nombre d'oiseaux comptés dépassera le nombre réel d'individus présents à un moment donné. Si l'observateur compte des oiseaux dans un secteur qui s'étend à quelque distance en avant de l'aéronef, une correction additionnelle sera nécessaire pour inclure les oiseaux qui entrent dans le champ de vision au cours de la période nécessaire pour se déplacer de la position initiale (A, figure 7) à la limite de champ de vision frontal (B).

L'intensité réelle de mouvement des oiseaux en vol peut être calculée à partir des intensités observées de mouvement en employant l'équation [9] (voir aussi l'équation [3] à l'annexe 2) :

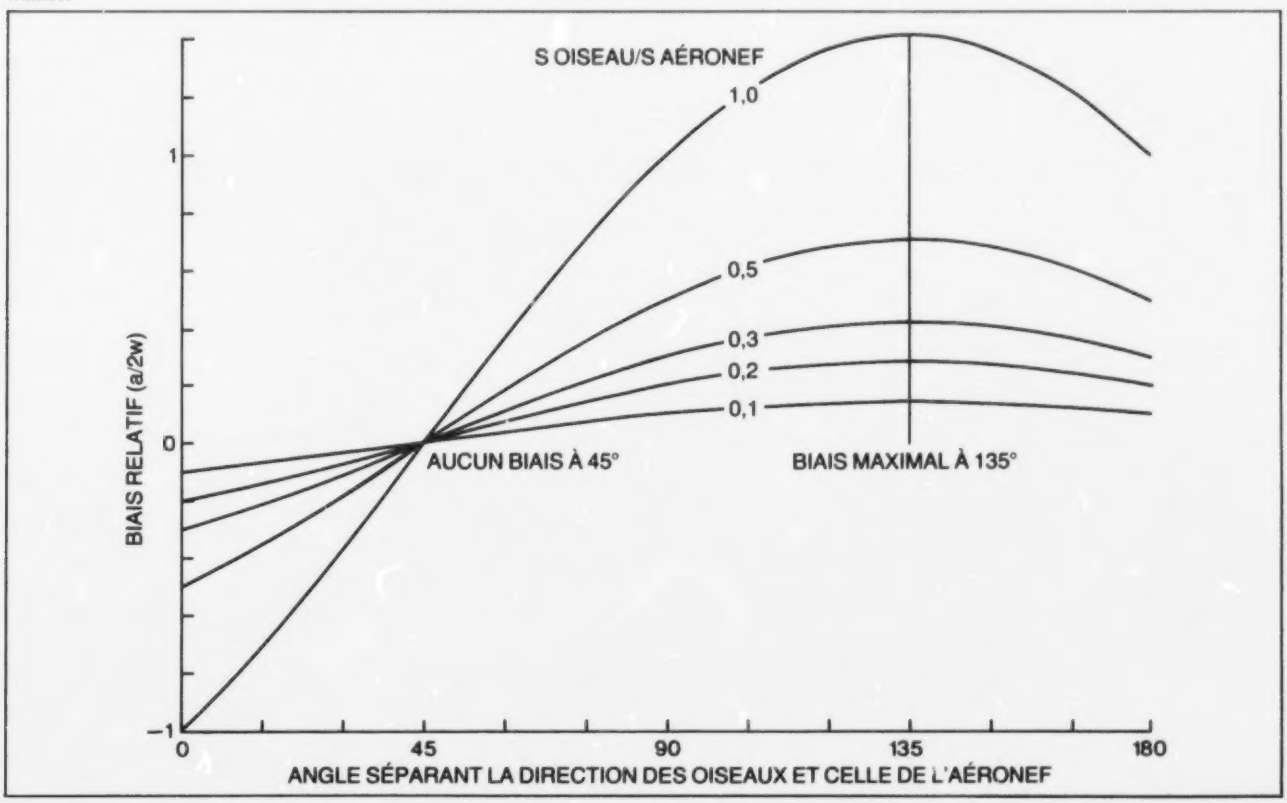
$$e = \frac{Ns}{t[(S - s\cos\theta)W + as\sin\theta]} \qquad [9]$$

où s = vitesse des oiseaux ($km \cdot h^{-1}$)
S = vitesse de l'aéronef ($km \cdot h^{-1}$)
W = largeur du transect (km)
a = limite frontale du champ de vision de l'observateur (km)
N = nombre total d'oiseaux comptés
t = période totale de vol (h)
D = densité des oiseaux
e = fréquence de passage ($oiseaux \cdot km^{-1} \cdot h^{-1}$)

Le rapport de e, tel que calculé à l'aide de l'équation [9], à e, obtenu par l'équation [8], est représenté pour différents rapports de s à S et différentes valeurs de θ à la figure 8 en supposant que $a = 0$ (l'observateur ne regarde pas à l'avant de l'aéronef). Dans ce cas, la correction est minimale quand $\theta = 45°$ et maximale quand $\theta = 135°$. Quand le champ de vision avant est équivalent à la largeur du transect, la correction requise est plus importante, atteignant un maximum à $\theta = 180°$, et un minimum à $\theta = 90°$ (figure 9). Dans tous les cas, le biais est le plus élevé quand la vitesse des oiseaux et de l'aéronef est la même et devient négligeable quand ces vitesses diffèrent d'un facteur de 5 ou plus ($s/S < 0{,}2$). Cette correction est probablement la plus utile lorsque les relevés sont effectués à bord d'hélicoptères ou que des espèces à vol rapide comme les marmettes sont observées. Étant donné que la plupart des espèces d'oiseaux de mer volent à une vitesse de 40 à 60 $km \cdot h^{-1}$, une telle correction pourrait aussi être utile dans le cas d'observations effectuées à bord d'un navire, lorsque la vitesse de ce dernier est supérieure à 10 $km \cdot h^{-1}$, en employant la forme généralisée de l'équation [9] :

$$e = \frac{Ns}{t(|S - s\cos\theta|W + as|\sin\theta|)} \qquad [10]$$

Figure 9
Relation entre les fréquences de passage observées et réelles (e_o/e_a), calculée pour la figure [7], en supposant que la vision à l'avant est égale à la largeur du transect



4. Durée et fréquence des plongeons

Le problème des erreurs introduites dans les numérations aériennes par les plongeons des oiseaux de mer à l'approche de l'aéronef est universellement reconnu. Les espèces qui plongent habituellement sous la surface pour se nourrir posent un problème additionnel, car même en l'absence de perturbation, une proportion des oiseaux présents sera hors de vue à un instant donné.

Pour la plupart des alcidés, des cormorans (*Phalacrocorax* spp.) et des huarts (*Gavia* spp.), la durée normale d'un plongeon peut atteindre jusqu'à 2 min (Tuck, 1961; Uspenski, 1956; Cody, 1973; Scott, 1973; AJG, observation personnelle). Cependant, la fréquence des plongeons est très variable et dépend probablement de plusieurs facteurs impondérables. Si la fréquence et la durée des plongeons étaient constantes pour une espèce donnée, elles ne modifieraient pas les comparaisons de l'abondance des espèces individuelles entre les différents secteurs. Malheureusement, on ignore à peu près tout de la variation dans la fréquence des plongeons, particulièrement pour les secteurs éloignés des eaux côtières.

S'il existe des données sur le temps passé sous l'eau, il est parfois possible de corriger les densités observées à l'aide de l'équation suivante :

$$N_f = N_o \Big/ \frac{s}{s+u} \qquad [11]$$

où u = durée moyenne des plongeons, et s = intervalle moyen entre les plongeons. McLaren (1961), qui a étudié les phoques annelés, donne une équation plus complexe pour ce facteur de correction, qui tient compte du nombre d'animaux submergés qui apparaissent à la surface pendant la période d'observation d'un plan d'eau donné :

$$N_f = N_o \Big/ \left(\frac{s}{s+u} + \frac{t}{s+u} \right) \qquad [12]$$

où t = durée d'observation d'un point donné sur l'eau (voir Eberhardt, 1978, pour la dérivation).

Lors de relevés aériens, le temps pendant lequel un point donné sur l'eau demeure dans le champ de vision est habituellement court (<10 s). En conséquence, l'expression $t/(s+u)$ est négligeable. Par contre, pour la plupart des observations effectuées à bord d'un navire, il est probable que t soit élevé par rapport à $s+u$, de sorte que la majorité des oiseaux submergés apparaissent à la surface pendant la période d'observation d'une zone donnée d'eau. La correction qui tient compte des oiseaux submergés devient donc inutile. Des observations ponctuelles indiquent que le rapport $(s+u)/s$ s'approche rarement de 2. Il est improbable que cette correction puisse être appliquée de façon généralisée aux relevés aériens en raison de la difficulté liée à la détermination de la proportion d'oiseaux qui plongent réellement.

La plupart des canards de mer [eiders (*Somateria* spp.), Canards kakawis (*Clangula hyemalis*), macreuses (*Oidemia, Melanitta* spp.)] tendent à synchroniser le plongeon et la quête de nourriture de sorte que, dans un très petit secteur, le nombre d'oiseaux observés peut varier considérablement selon qu'une volée (parfois plusieurs centaines d'oiseaux) est en «vol» ou en «plongée». Ce phénomène pourrait expliquer certains écarts importants entre les données de relevés effectués au sol et dans les airs sur les canards de mer (Stott et Olson, 1972; Savard, 1982).

La tendance des oiseaux à s'envoler ou à plonger lorsqu'ils aperçoivent un aéronef constitue un problème connexe. Habituellement, les espèces qui passent la plus grande partie de leur temps en vol (mouettes, pétrels, etc.) se réfugient dans les airs et deviennent donc plus visibles pour l'observateur, tandis que celles qui ne volent pas beaucoup (alcidés, huarts) ont tendance à plonger sous la surface. Parfois, les alcidés et, occasionnellement, certains canards de mer plongent directement dans les eaux à la vue d'un aéronef sans se poser auparavant à la surface. Ce comportement est particulièrement courant chez le Mergule nain (*Alle alle*).

Marmettes au repos dans une colonie (photo : SCF)

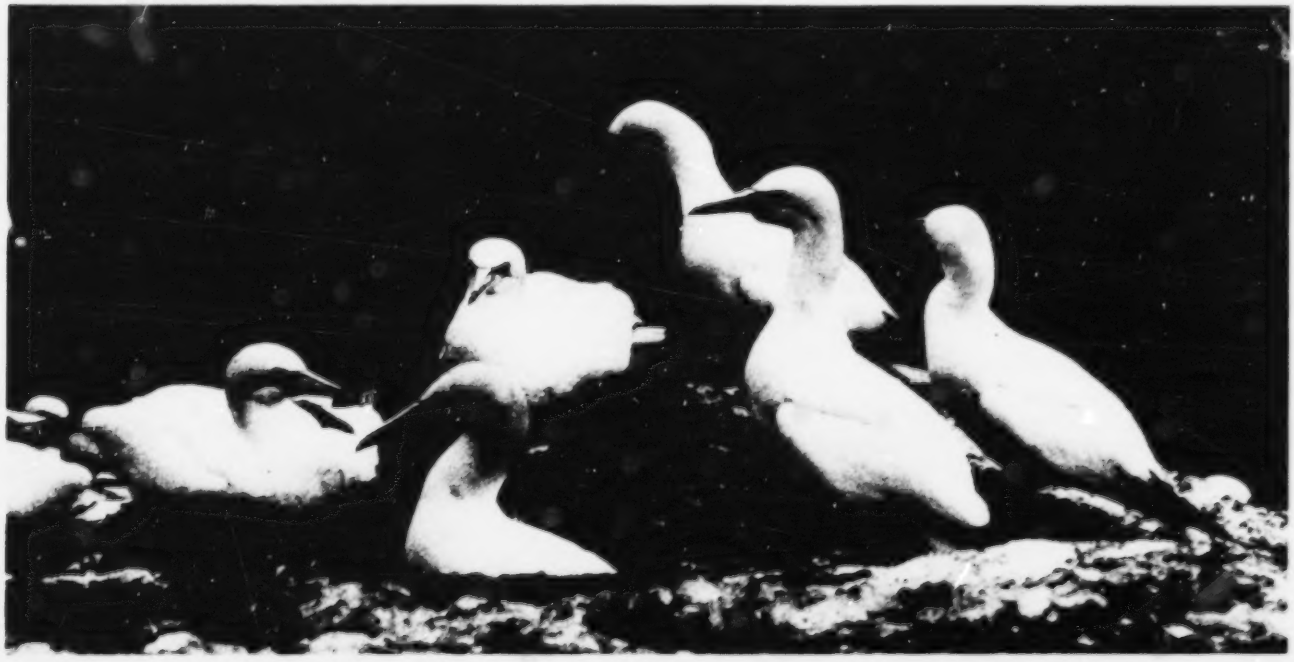


Figure 10
Intensité de relevé nécessaire pour obtenir un coefficient donné de variation pour une évaluation de la population, par rapport à la taille de la volée : A, coefficient de variation = 10 %; B, coefficient de variation = 30 %

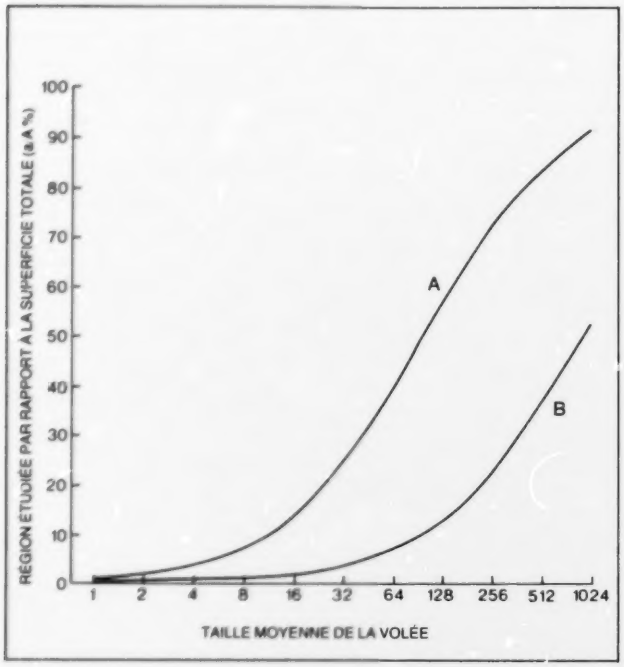
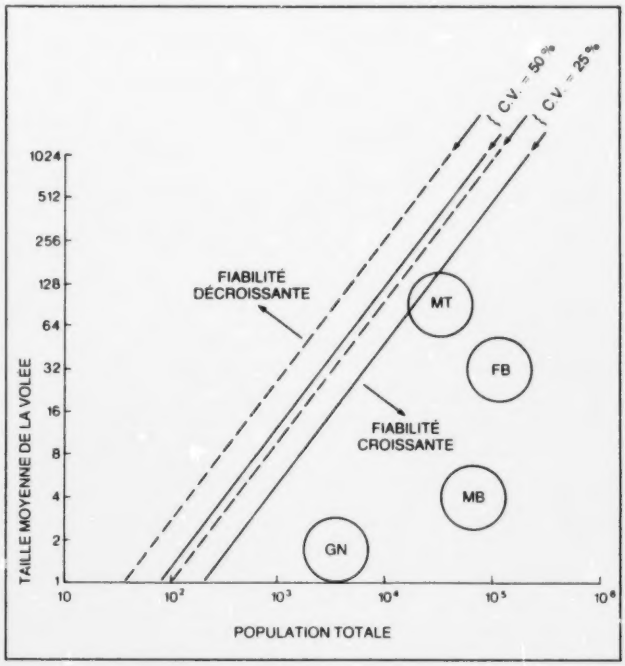


Figure 11
Guide de fiabilité des évaluations effectuées à partir de relevés aériens par rapport à la population totale et aux volées moyennes. Les lignes pleines représentent les relevés où les bandes de transect couvrent 5 % de la superficie totale, les lignes en tirets, 2 %. La population approximative et la taille des volées sont également illustrées pour les espèces observées par Nettleship et Gaston (1978) : FB = Fulmar boréal, MT = Mouette tridactyle, MB = Marmette de Brünnich, GN = Guillemot noir



Bien que ces réactions soient visiblement liées au comportement particulier des espèces, elles sont probablement fort influencées par d'autres facteurs comme le type et l'altitude de l'aéronef, ainsi que le bruit de fond causé par le vent et les vagues. Il est donc impossible de recommander un facteur de correction approprié et nous ne pouvons que suggérer de tenir compte du problème lors de comparaisons entre des données recueillies à bord de différents aéronefs ou à l'aide de diverses méthodes de relevé.

5. Degré de rassemblement

Certains oiseaux de mer forment habituellement des volées dont la taille varie selon les saisons et les diverses régions géographiques. Dans de nombreux cas, ces volées sont très denses (Mouettes tridactyles, Mergules nains, eiders) et en conséquence, les volées plutôt que les individus constituent les unités consignées. Burnham *et al.* (1980) ont traité des effets de ces rassemblements sur les résultats obtenus sur les transects mais n'ont pas abordé ces mêmes effets sur la relation entre l'intensité et l'exactitude des relevés.

La précision des résultats de relevés dépend de la zone incluse dans les bandes de transect, par rapport à la superficie totale concernée (intensité du relevé). Cependant, pour un secteur donné couvert par des transects, la précision des évaluations qui en résultent dépend de la fréquence d'observation des unités consignées (individus ou volées). Pour une population fixe, le nombre et la densité des volées sont inversement proportionnels à leur taille moyenne. En conséquence, pour obtenir le même degré de précision, l'intensité du relevé doit augmenter avec la taille de la volée. La figure 10 (à l'annexe 3) illustre cette relation à l'aide de quelques exemples hypothétiques.

La plupart des séries de transects utilisées lors de relevés aériens couvrent une proportion relativement petite de la superficie totale (<5 %). De plus, les volées de certaines espèces peuvent réunir des centaines et occasionnellement des milliers d'oiseaux. En conséquence, les volées peuvent limiter considérablement la précision des relevés pour certaines espèces. On peut utiliser la figure 11 comme guide de fiabilité des relevés quant à la taille des volées et à la population totale concernée. Cette dernière peut être connue approximativement à partir des évaluations du nombre d'oiseaux reproducteurs locaux. Pour des volées et des populations au-dessus et à gauche des lignes diagonales de la figure 10, les relevés qui couvrent moins de 5 % de la superficie totale des eaux peuvent être considérés comme non fiables, étant donné que le facteur de variation dans les évaluations qui en découlent dépasse 50 %.

Nettleship et Gaston (1978) ont étudié quatre espèces dans les détroits de Barrow et de Lancaster, et leur position approximative est également illustrée à la figure 11. Les intensités de relevés, qui ont varié de 1,5 à 3,5 % de la superficie totale, étaient probablement adéquates pour le Fulmar boréal, la Marmette de Brünnich et le Guillemot noir, mais moins fiables pour la Mouette tridactyle. Les auteurs eux-mêmes en viennent à cette conclusion dans leur étude.

Analyse

Étant donné que plusieurs des situations décrites dans le présent document se rapportent à l'analyse de relevés effectués pendant la saison de reproduction, les corrections proposées exigent des connaissances sur la biologie de reproduction des espèces concernées. Théoriquement, lorsque l'on envisage, pendant la période de reproduction, d'étudier la répartition des oiseaux de mer d'après des relevés aériens, il est préférable de les combiner à des observations simultanées dans les colonies des principales espèces concernées. Comparativement au coût des relevés aériens, celui des observations dans les colonies est probablement assez modeste; ces observations améliorent en outre les données obtenues au cours des relevés. Les données les plus pertinentes comprennent la fréquence des visites aux colonies, mesurée par la fréquence des échanges dans la tâche de l'incubation entre les partenaires, la fréquence du nourrissage des petits, et le temps passé dans la colonie par chaque partenaire. Les comparaisons directes entre le nombre d'oiseaux présents dans la colonie et le nombre d'individus en mer peuvent également aider à confirmer les résultats des relevés aériens.

Quand il est nécessaire d'effectuer une correction pour compenser la vitesse relative des oiseaux et de l'aéronef, l'angle formé par les directions suivies par les oiseaux et l'aéronef doit être calculé. Cependant, cette méthode est difficile à appliquer sur le terrain, car les oiseaux peuvent modifier leur route à l'approche de l'aéronef. Si les oiseaux concernés se dirigent de toute évidence vers une colonie importante ou en reviennent, il peut être possible d'évaluer de façon précise leur direction en établissant la position de la colonie par rapport à celle de l'aéronef. Sinon, il faut utiliser la direction suivie par des oiseaux éloignés, qui sont à une distance trop grande pour que l'aéronef puisse les perturber. La distance à laquelle l'observateur peut identifier les oiseaux en avant de l'aéronef doit aussi être évaluée et consignée. Dans tous les cas, il peut être utile de confirmer cette distance, car elle détermine la période pendant laquelle un oiseau est visible pour l'observateur. Cette période, à son tour, détermine vraisemblablement la précision avec laquelle l'observateur peut identifier l'oiseau ou, dans le cas d'une volée, évaluer le nombre d'oiseaux présents.

Un autre secteur où l'interprétation des résultats de relevés pourrait être améliorée par des données additionnelles est la quantification du temps passé sous l'eau par différentes espèces d'oiseaux plongeurs et la variation de cette période selon l'heure du jour et la saison. Ceci suppose non seulement l'évaluation des périodes de plongeon et de repos pendant la phase d'alimentation, mais aussi celle des phases d'alimentation et de repos elles-mêmes. Il peut également être possible de mesurer la réaction des oiseaux à l'aéronef à différentes distances et altitudes.

Bien que nous ayons choisi d'insister sur les biais et les inexactitudes causés par le comportement des oiseaux, il est évident que ceux-ci interagissent avec d'autres variables des relevés, soit les conditions météorologiques, le type d'aéronef, les méthodes employées lors du relevé et les différences liées à l'observateur. Étant donné un tel nombre de variables déconcertantes qui interagissent entre elles, le concept global des relevés aériens pourrait être remis en question. Heureusement, la plupart des relevés ne s'étendent que sur une période limitée pendant laquelle on peut prévoir des conditions météorologiques et un comportement des oiseaux relativement stables. Si, de plus, on a recours aux mêmes observateurs et au même aéronef de façon répétée, une source considérable de biais sera éliminée. Toutefois, quand on compare un petit nombre de relevés, effectués avec des aéronefs et un personnel différents, à diverses périodes de l'année et avec des méthodes différentes, il devient impossible de faire des évaluations quantitatives, d'où l'utilité probablement fort limitée de ce type de relevés.

Annexes

Annexe 1

Méthode utilisée pour corriger les densités observées afin de compenser les variations des durées de déplacement

Cette méthode est utilisée pour dériver des facteurs de correction pour les densités observées d'oiseaux, dans les cas où l'on ne fait pas de distinction entre les individus qui s'alimentent et ceux qui voyagent à destination et en provenance des aires d'alimentation. Diviser le secteur à l'intérieur du territoire d'alimentation de la colonie, mais à l'exclusion de la colonie même, en zones concentriques 1, 2, 3, . . . , z (figure 4). La zone i inclut le secteur de L_{i-1} à L_i km de la colonie.

Soit
- V = nombre quotidien de visites à la colonie par oiseau
- S = vitesse de vol
- L = distance séparant la colonie du point d'observation d'un oiseau
- T_b = période totale passée à la colonie par oiseau, chaque jour
- n_{oi} = nombre moyen d'oiseaux qui survolent la zone i ou s'y alimentent à un moment donné
- n_{fi} = nombre moyen d'oiseaux qui s'alimentent dans la zone i à un moment donné
- N_{fi} = nombre total d'oiseaux qui utilisent la zone i pour s'alimenter
- m_{ij} = nombre moyen d'oiseaux se nourrissant dans la zone j et qui survolent la zone i à un moment donné
- $n_{oz} = n_{fz}$ = nombre d'oiseaux qui survolent la zone limite extérieure ou s'y alimentent

Pour toute zone i, le nombre d'oiseaux qui s'alimentent à un moment donné est le nombre total présent moins le nombre d'individus qui se dirigent vers des zones plus éloignées ou qui en reviennent, c'est-à-dire :

$$n_{fi} = n_{oi} - \sum_{j=i+1}^{z} m_{ij} \qquad [A1]$$

Sur le nombre N_{fj} d'oiseaux qui s'alimentent dans la zone j, le nombre moyen d'individus qui survolent la zone i à un moment donné est :

$$m_{ij} = 2VN_{fj}(L_i - L_{i-1})/24S \qquad [A2]$$

De plus, un oiseau qui se nourrit à L km de distance de la colonie consacre réellement $24 - T_b - 2VL/S$ heures à s'alimenter, c'est-à-dire qu'une partie

$$1 - \frac{T_b}{24} - \frac{VL}{12S}$$

des oiseaux s'alimentent réellement à tout moment donné. Pour visiter la zone i, les oiseaux doivent voyager pendant $(2L_{i-1})/S$. Donc,

$$N_{fi} = \frac{2n_{fi}}{24 - T_b - 2VL_{i-1}/S} \qquad [A3]$$

En substituant [A2] et [A1] à [A3], on obtient

$$N_{fi} = \frac{24n_{oi} - [2V(L_i - L_{i-1}) \sum_{j=i+1}^{z} N_{fj}]}{(24 - T_b)S - 2VL_{i-1}} \qquad [A4]$$

N_{fi} peut être calculé successivement en commençant par la zone limite extérieure z, où :

$$N_{fz} = \frac{24n_{oz}}{24 - T_b - (2VL_{z-1})/S}$$

Annexe 2

Corrections pour compenser le déplacement relatif des oiseaux et de l'aéronef

1. Dérivation de l'équation pour la fréquence de déplacement d'après des observations effectuées à bord d'un aéronef

Dans la présente section, nous dériverons une équation pour calculer la fréquence de déplacement (c'est-à-dire le nombre d'oiseaux par unité de temps qui traversent une ligne, soit une unité de longueur, perpendiculaire à la route de vol des oiseaux) lorsque les observations sont effectuées à bord d'une plate-forme en mouvement (un aéronef, un bateau, etc.).

Nous dériverons d'abord une équation qui établit un rapport entre la densité des volées, leur vitesse et leur fréquence de déplacement. Considérons un secteur de 1 km^2 dans lequel les oiseaux pénètrent perpendiculairement à un des côtés.

s = vitesse des oiseaux ($km \cdot h^{-1}$)
e = fréquence à laquelle les oiseaux traversent un côté par unité de longueur ($oiseaux \cdot h^{-1} \cdot km^{-1}$)
D = densité des oiseaux ($oiseaux \cdot km^{-2}$)

Chaque individu passe s^{-1} h dans le carré. Donc, pour pouvoir maintenir D individus dans ce carré, D oiseaux doivent y pénétrer à chaque S^{-1} h.

$$\text{Donc, } e = D/s^{-1} = Ds \qquad [A5]$$

s étant connu, il est possible de déterminer la fréquence de déplacement e si la valeur de D peut être évaluée.

Examinons la situation de la figure 7 où :
1) la vitesse des oiseaux est s $km \cdot h^{-1}$
2) la vitesse de la plate-forme est S $km \cdot h^{-1}$
3) les oiseaux volent à un angle θ° par rapport à la plate-forme
4) la largeur du transect est w km
5) la distance maximale d'observation des oiseaux en avant dans le transect est a km

Pour simplifier la dérivation, nous supposerons que $\theta > 0$, c'est-à-dire que les oiseaux volent dans une direction ascendante (figure 3) et que la composante de la vitesse des oiseaux qui volent dans la même direction que la plate-forme, $s\cos\theta$, est inférieure à la vitesse de la plate-forme S, c'est-à-dire que la plate-forme se rapproche des oiseaux, ou $S - s\cos\theta > 0$.

Pour chaque S km que la plate-forme parcourt vers la droite (figure 3), les oiseaux parcourent $s\cos\theta$ km vers la droite, et $s\sin\theta$ km vers le haut. Donc, par rapport à la plate-forme, les oiseaux parcourent $(S - s\cos\theta)t$ km vers la gauche toutes les t heures, et $st\sin\theta$ km vers le haut. En conséquence, depuis la plate-forme, les oiseaux semblent voler à un angle θ exprimé par :

$$\tan\theta = \frac{s\sin\theta}{S - s\cos\theta} \qquad [A6]$$

Les hachures verticales de la figure 7 représentent les positions au temps t des oiseaux aperçus par les observateurs, mais qui ont disparu du champ de vision. Bien que les observateurs ne comptent que les oiseaux à moins de $w/2$ de chaque côté de l'aéronef, ce qui donne un transect d'une largeur w, la largeur réelle du transect est supérieure à w parce que certains oiseaux pénètrent dans le champ de vision (contre-hachure de la figure 7) par le côté inférieur du rectangle plutôt qu'à l'avant.

La largeur additionnelle donnée au transect par le fait que les observateurs comptent les oiseaux jusqu'à a unités à l'avant est :

$$w_a = a\tan\theta = \frac{as\sin\theta}{S - s\cos\theta}$$

Donc, la largeur du transect est réellement :

$$W = w + w_a = w + \frac{as\sin\theta}{S - s\cos\theta}$$

En conséquence, en t heures, la superficie explorée par les observateurs est :

$$A = W(S - s\cos\theta)t + aw$$

Si N individus sont comptés en t heures, la densité des oiseaux est $D = N/A$, et selon l'équation [1], le nombre d'individus qui traversent une ligne de 1 km par heure est :

$$e = Ds = \frac{Ns}{A} = \frac{Nv}{t\left[\dfrac{w + as\sin\theta}{S - s\cos\theta}\right](S - s\cos\theta) + aw} \qquad [A7]$$

$$e = \frac{Ns}{t[(S - s\cos\theta)w + as\sin\theta] + aw}$$

Si la zone contre-hachurée était omise, comme ce serait le cas si le transect était survolé, et les données consignées en segments de temps ou de longueur équivalents (puisque cette portion aurait été comptée dans le segment précédent), il en résulterait :

$$e = \frac{Ns}{t[(S - s\cos\theta)w + as\sin\theta]} \qquad [A8]$$

Cette correction a été dérivée en supposant que $S - s\cos\theta > 0$ et $\theta > 0$. Si $S - s\cos\theta < 0$ (c'est-à-dire que les oiseaux se rapprochent de la plate-forme d'observation, ce qui pourrait être le cas si la plate-forme était un bateau plutôt qu'un aéronef), le raisonnement précédent produirait l'équation [3] mais $S - s\cos\theta$ serait remplacé par $s\cos\theta - S$. De même, si $\theta < 0$ (c'est-à-dire un vol en direction descendante, figure 7), $\sin\theta$ serait remplacé par $\sin(-\theta)$. Donc, l'équation qui tient compte de tous les angles et de toutes les vitesses de la plate-forme est :

$$e = \frac{Ns}{t[|S - s\cos\theta|w + as\sin|\theta|)} \qquad [A9]$$

Des exemples particuliers suivent :

1) Si $\theta = 90°$; $\quad e = \dfrac{Ns}{tSw + as}$

2) Si $a = 0$; $\quad e = \dfrac{Ns}{tw|S - s\cos\theta|}$

3) Si $\theta = 90°$ et $a = 0$; $e = \dfrac{Ns}{tSw}$

2. Absence de correction en fonction du déplacement des oiseaux en vol au cours de relevés aériens

Examinons le biais introduit en l'absence de toute correction en fonction de la vitesse et de la direction des oiseaux en vol. On pourrait admettre qu'il est possible de négliger l'effet de leur déplacement, car la plate-forme (dans ce cas, l'aéronef) se déplace beaucoup plus rapidement que les oiseaux. Si aucune correction n'est effectuée, l'évaluation de la densité D, telle que définie avant l'équation [1] est D = nombre d'oiseaux observés/superficie totale explorée à partir de la plate-forme, ou $D = N/(tSw)$. Donc, à partir de [1], la fréquence de migration non corrigée est :

$$e_1 = Ns/(tSw) \qquad [A10]$$

À partir de [4] et [5], l'erreur relative en e_1 est :

$$B = (e - e_1)/e$$

$$= 1 - \left(\left| 1 - \frac{s}{S} \cos\theta \right| + \frac{a}{w} \cdot \frac{v}{S} |\sin\theta| \right) \qquad [A11]$$

En conséquence, B ne dépend que du rapport de la vitesse des oiseaux (s) à la vitesse de la plate-forme (S), du rapport du champ de vision maximal à l'avant (a) à la largeur du transect (w), et de l'angle θ.

Étant donné qu'il est indifférent pour les calculs que les oiseaux croisent la route de vol de l'aéronef par la gauche ou par la droite, nous supposerons que θ est compris entre 0° et 180°, c'est-à-dire que les oiseaux pénètrent par la droite. De plus, étant donné que nous examinons des relevés aériens où les oiseaux volent moins vite que la plate-forme, nous supposons que $s/S < 1$. Donc, l'équation précédente pour déterminer le biais devient :

$$B = 1 - (R\cos\theta + KR\sin\theta) \qquad [A12]$$

où $K = a/w$ = distance du champ de vision/largeur du transect, et $R = s/S$ = vitesse des oiseaux/vitesse de la plate-forme.

Les figures 8 et 9 montrent les biais inhérents à l'équation [A9] pour diverses valeurs de K, R, et θ. On remarque que lorsque θ tend vers zéro (les oiseaux volent à peu près dans la même direction que la plate-forme), B est négatif, c'est-à-dire que la fréquence e est sous-évaluée. Lorsque θ est grand (vol des oiseaux dans la direction opposée), B est positif et e est surévalué. De plus, l'erreur s'accroît à mesure que R augmente. La comparaison des figures montre que l'erreur s'accroît avec K, c'est-à-dire quand on compte les oiseaux qui sont à une grande distance à l'avant de l'aéronef, dans le transect.

Pour des valeurs particulières de R et K, l'équation [A12] et les figures 8 et 9 montrent que le biais a une valeur négative maximale de $B_0 = -R$ quand $\theta = 0°$, qu'elle augmente jusqu'à zéro à mesure que θ augmente jusqu'à $\theta = \arctan(1/K)$, qu'elle continue à s'accroître jusqu'à un maximum de $B_{max} = R\sqrt{1 + K^2}$ à mesure que θ augmente jusqu'à $\theta = \arctan(-K)$, et qu'elle diminue jusqu'à $B_{180} = R$ dans le cas de $\theta = 180°$.

Calculons maintenant B dans des cas particuliers. Supposons que $R = 0{,}3$ et $K = 0{,}5$, c'est-à-dire que les oiseaux volent à une vitesse égale à 30 % de celle de l'aéronef et que les observateurs n'effectuent pas de dénombrement à l'avant de l'appareil. Donc, d'après le paragraphe précédent, B varie de –0,3 quand $\theta = 0°$ à +0,3 quand $\theta = 180°$ (figure 8, $B = 0{,}3$). Si $K = 1{,}0$, c'est-à-dire que le champ de vision des observateurs correspond à la largeur du transect, B varie de –0,3 quand $\theta = 0°$ à un maximum de +0,43 quand $\theta = 135°$ (figure 9). Ces erreurs de nature systématique ne sont pas modifiées par la taille de l'échantillon.

Lorsqu'on évalue la densité ou la fréquence de déplacement, il est avantageux d'inclure dans le transect les oiseaux qui sont à une bonne distance à l'avant de l'aéronef. Cette approche tend à augmenter le nombre d'oiseaux comptés et en conséquence la précision ultime de l'évaluation fournie :

1) les observateurs peuvent déterminer de façon précise si un oiseau dans le transect est à l'intérieur de la distance de vision donnée (a);

2) les oiseaux sont nettement visibles à une distance «a» à l'avant de l'aéronef;

3) le déplacement des oiseaux est pris en considération dans le calcul de la fréquence de mouvement (e) ou de la densité (D).

Annexe 3

Dérivation des rapports entre la taille de la volée, la population totale et le degré de précision obtenu pour une partie donnée de la zone étudiée

Soit A = superficie totale considérée
a = superficie totale couverte par les bandes de transect
N = nombre d'oiseaux dans la zone A
M = nombre de volées dans la zone A
n = taille moyenne d'une volée

Nous supposons que :
1) n est constant (donc, $n = N/M$)
2) les volées sont réparties au hasard dans la zone

Donc, le nombre de volées comptées (y) a une distribution binomiale avec E moyen (y) = Mp et une variance $Mp(1-p)$, où $p = a/A$.

En conséquence, il est possible d'évaluer N de la façon suivante :

$\hat{N} = ny/p$, la variance étant obtenue par
$V = n\hat{N}(1-p)/p$

$$\text{Donc : } \frac{a}{A} = \frac{Nn}{V + Nn} \qquad [A13]$$

À l'aide de cette équation, nous examinons la relation entre la taille de la volée n, et l'intensité du relevé a/A requise pour évaluer une population d'une taille donnée N avec une variance donnée V (figure 10). D'autre part, il est possible d'examiner la relation entre la taille de la volée et la population totale quand la variance et l'intensité du relevé sont fixes (figure 11).

Bibliographie

Birkhead, T.R. 1978. Attendance patterns of guillemots *Uria aalge* at breeding colonies on Skomer Island. Ibis 120:219–229.

Burnham, K.P.; Anderson, D.R.; Laake, J.L. 1980. Estimation of density from line transect sampling of biological populations. Wildl. Monogr. 72. 202 pp.

Cody, M.L. 1973. Coexistence, coevolution and convergent evolution in seabird communities. Ecology 54 :41–44.

Eberhardt, L.L. 1978. Transect methods for population studies. J. Wildl. Manage. 42:1–31.

Gaston, A.J.; Nettleship, D.N. 1983. La Marmette de Brünnich de l'île Prince-Léopold. Serv. can. de la faune. Monographie n° 6. 361 pp.

Harrison, C.S. 1982. Spring distribution of marine birds in the Gulf of Alaska. Condor 84:245–254.

Johnson, S.R.; Renaud, W.E.; Richardson, W.J.; Davis, R.A.; Holdsworth, C.; Hollingdale, P.D. 1976. Aerial surveys of birds in eastern Lancaster Sound, 1976. Inédit. LGL Ltd., Environ. Res. Assoc. Rep., Norlands Petroleums, Calgary, Alberta. 365 pp.

Lloyd, C.S. 1975. Timing and frequency of census counts on cliff-nesting auks. Brit. Birds 68:507–513.

MacLaren Marex. 1979. Report on aerial surveys of birds and marine mammals in the southern Davis Strait between April and December 1978. Volume II, Marine Birds. Inédit. MacLaren Marex Inc., St-Jean, Terre-Neuve. Rapp. présenté à Esso Resources, Canada, Aquitaine Co. of Canada Ltd. et Canada Cities Services Ltd.

McLaren, I.A. 1961. Methods of determining the numbers and availability of ringed seals in the eastern Canadian arctic. Arctic 14:162–175.

McLaren, P.L. 1982. Spring migration and habitat use by seabirds in eastern Lancaster Sound and western Baffin Bay. Arctic 35:88–111.

Nettleship, D.N. 1972. Breeding success of the common puffin (*Fratercula arctica*) on different habitats at Great Island, Newfoundland. Ecol. Monogr. 42:239–268.

Nettleship, D.N. 1977. Études sur les oiseaux de mer de l'île du Prince-Léopold et de ses parages, aux Territoires du Nord-Ouest. Rapport provisoire des recherches de biologie menées en 1975. Sev. can. de la faune. Cahier de biol. n° 73. 11 pp.

Nettleship, D.N.; Gaston, A.J. 1978. Patterns of pelagic distribution of seabirds in western Lancaster Sound and Barrow Strait, Northwest Territories, in August and September 1976. Serv. can. de la faune. Pub. hors série n° 39, 40 pp.

Orr, C.D.; Ward, R.M.P. 1982. The fall migration of Thick-billed Murres near southern Baffin Island and Northern Labrador. Arctic 35:531–536.

Petersen, A. 1981. Breeding biology and feeding ecology of black guillemots. Thèse de doctorat en philosophie, Univ. Oxford, Oxford, Angleterre.

Savard, J.-P.L. 1982. Variabilité des relevés aériens effectués sur la côte; comparaisons entre les observateurs et les données recueillies dans les airs et au sol. Rapport préliminaire. Serv. can. de la faune. Cahier de biol. n° 127, 7 pp.

Scott, J.M. 1973. Resource allocation in four syntopic species of marine diving birds. Thèse de doctorat, Oregon State Univ., Corvallis, Ore. 98 pp.

Slater, P.J.B. 1976. Tidal rhythm in a seabird. Nature (Lond.) 264:636–638.

Stott, R.S.; Olson, D.P. 1972. An evaluation of waterfowl surveys on the New Hampshire coastline. J. Wildl. Manage. 36:468–477.

Tuck, L. 1961. Les marmettes. Serv. can. de la faune. Monographie n° 1. 284 pp.

Uspenski, V.S. 1956. The bird bazaars of Novaya Zemlya. USSR Acad. Sci., Moscou (4e vol. des rapports sur le gibier traduits du russe par le SCF). 159 pp.

Autres publications hors série

N° 1
Les oiseaux protégés au Canada en vertu de la Loi sur la Convention concernant les oiseaux migrateurs, 4e éd. Bilingual publication.
N° de cat. CW69-1/1. Publ. en 1957, rév. en 1980.
N° 2
Noms des oiseaux du Canada. Noms français, anglais et scientifiques. Bilingual publication.
N° de cat. CW69-1/2. Publ. en 1957, rév. en 1972.
N° 3
Use of aerial surveys by the Canadian Wildlife Service, par D.A. Benson. Épuisé.
N° de cat. R69-1/3. Publ. en 1963, réimp. en 1966.
N° 4
Queen Elizabeth Islands game survey, 1961, par J.S. Tener.
N° de cat. CW69-1/4. Publ. en 1963, réimp. en 1972.
N° 5
Age determination in the polar bear, par T.H. Manning.
N° de cat. CW69-1/5. Publ. en 1964, réimp. en 1973.
N° 6
A wildlife biologist looks at sampling, data processing and computers, par D.A. Benson.
Épuisé
N° de cat. R69-1/6. Publ. en 1964.
N° 7
Preliminary report on the effects of phosphamidon on bird populations in New Brunswick, par C.D. Fowle.
Épuisé.
N° de cat. R69-1/7. Publ. en 1965.
N° 8
Birds of Nova Scotia-New Brunswick border region, par G.F. Boyer.
N° de cat. CW69-1/8. Publ. en 1966, réimp. en 1981.
N° 9
Effects of dietary methylmercury on Ring-necked Pheasants, with special reference to reproduction, par N. Fimreite.
N° de cat. R69-1/9. Publ. en 1971.
N° 10
Trends in populations of barren-ground caribou over the last two decades: a re-evaluation of the evidence, par G.R. Parker.
N° de cat. CW69-1/10. Publ. en 1971, réimp. en 1972.
N° 11
The Canada migratory game bird hunting permit and related surveys, par D.A. Benson.
N° de cat. R69-1/11. Publ. en 1971.
N° 12
Observations on duck hunting in eastern Canada in 1968 and 1969, par J.H. Boyd.
N° de cat. R69-1/12. Publ. en 1971.
N° 13
Evaluation of ecological effects of recent low water levels in the Peace-Athabasca Delta, par H.J. Dirschl.
N° de cat. CW69-1/13. Publ. en 1972.
N° 14
The Great Cormorants of eastern Canada, par A.J. Erskine.
N° de cat. CW69-1/14. Publ. en 1972.
N° 15
Distribution of barren-ground caribou harvest in north-central Canada, par G.R. Parker.
N° de cat. CW69-1/15. Publ. en 1972.
N° 16
Bird migration forecast for military air operations, par H. Blokpoel.
N° de cat. CW69-1/16. Publ. en 1973.
N° 17
Waterfowl populations on the Peace-Athabasca Delta, 1969 and 1970, par D.J. Nieman et H.J. Dirschl.
N° de cat. CW69-1/17. Publ. en 1973.
N° 18
Gammarus predation and the possible effects of *Gammarus* and *Chaoborus* feeding on the zooplankton composition in some small lakes and ponds in western Canada, par R.S. Anderson et L.G. Raasveldt.
N° de cat. CW69-1/18. Publ. en 1974.
N° 19
A summary of DDE and PCB determinations in Canadian birds, 1969 to 1972, par M. Gilbertson et L. Reynolds.
N° de cat. CW69-1/19. Publ. en 1974.
N° 20
Development of a simulation model of Mallard Duck populations, par C.J. Walters, R. Hilborn, E. Oguss, R.M. Peterman et J.M. Stander.
N° de cat. CW69-1/20. Publ. en 1974.
N° 21
Use of museum specimens in toxic chemical research, par A.M. Rick.
N° de cat. CW69-1/21. Publ. en 1975.
N° 22
Impoundments for waterfowl, par W.R. Whitman.
N° de cat. CW69-1/22. Publ. en 1976.
N° 23
Minimizing the dangers of nesting studies to raptors and other sensitive species, par R.W. Fyfe et N.R. Olendorff.
N° de cat. CW69-1/23. Publ. en 1976.
N° 24
Waterfowl damage to Canadian grain: current problems and research needs, par L.G. Sugden.
N° de cat. CW69-1/24. Publ. en 1976.
N° 25
Census techniques for seabirds of arctic and eastern Canada, par D.N. Nettleship.
N° de cat. CW69-1/25. Publ. en 1976.
N° 26
Notes on the present status of the polar bear in James Bay and Belcher Islands area, par Charles Jonkel, Pauline Smith, Ian Stirling et George B. Kolenosky.
N° de cat. CW69-1/26. Publ. en 1976.
N° 27
Limnological and planktonic studies in the Waterton Lakes, Alberta, par R. Stewart Anderson et Roderick B. Green.
N° de cat. CW69-1/27. Publ. en 1976.
N° 28
Birds and mammals of the Belcher, Sleeper, Ottawa, and King George Islands, Northwest Territories, par T.H. Manning.
N° de cat. CW69-1/28. Publ. en 1976.
N° 29
Developments in PPS sampling — Impact on current research, par A.R. Sen.
N° de cat. CW69-1/29. Publ. en 1976.
N° 30
Dynamics of snowshoe hare populations in the Maritime Provinces, par Thomas J. Wood et Stanley A. Munroe.
N° de cat. CW69-1/30. Publ. en 1977.
N° 31
Migration and population dynamics of the Peace-Athabasca Delta goldeye population, par D.B. Donald et A.H. Kooyman.
N° de cat. CW69-1/31. Publ. en 1977.
N° 32
The effects of fire on the ecology of the Boreal Forest, with particular reference to the Canadian north: a review and selected bibliography, par John P. Kelsall, F.S. Telfer et Thomas D. Wright.
N° de cat. CW69-1/32. Publ. en 1977.
N° 33
The ecology of the polar bear (*Ursus maritimus*) along the western coast of Hudson Bay, par Ian Stirling, Charles Jonkel, Pauline Smith, Richard Robertson et Dale Cross.
N° de cat. CW69-1/33. Publ. en 1977.
N° 34
Canvasback habitat use and production in Saskatchewan parklands, par Lawson G. Sugden.
N° de cat. CW69-1/34. Publ. en 1978.

N° 35
The diets of muskoxen and Peary caribou on some islands of the Canadian High Arctic, par Gerald R. Parker.
N° de cat. CW69-1/35. Publ. en 1978.
N° 36
Observations of Mallards in the parkland of Alberta, par Michael F. Sorensen.
N° de cat. CW69-1/36. Publ. en 1978.
N° 37
The wildlife valuation problem: A critical review of economic approaches, par William A. Langford et Donald J. Cocheba.
N° de cat. CW69-1/37. Publ. en 1978.
N° 38
Spatial changes in waterfowl habitat, 1964–74 on two land types in the Manitoba Newdale Plain, par G.D. Adams et G.C. Gentle.
N° de cat. CW69-1/38. Publ. en 1978.
N° 39
Patterns of pelagic distribution of seabirds in western Lancaster Sound and Barrow Strait, Northwest Territories, in August and September 1976, par D.N. Nettleship et A.J. Gaston.
N° de cat. CW69-1/39. Publ. en 1978.
N° 40
Responses of Peary caribou and muskoxen to helicopter harassment, par Frank L. Miller et Anne Gunn.
N° de cat. CW69-1/40. Publ. en 1979.
N° 41
Des communautés aviennes du parc national de la Mauricie, Québec, par J.L. DesGranges. Also available in English.
N° de cat. CW69-1/41F. Publ. en 1979.
N° 42
Études écologiques de la population d'ours blancs dans le nord du Labrador, par Ian Stirling et H.P.L. Kiliaan. Also available in English.
N° de cat. CW69-1/42F. Publ. en 1980.
N° 43
Méthodes de recensement des marmettes, espèce *Uria*: une approche unifiée, par T.R. Birkhead et D.N. Nettleship. Also available in English.
N° de cat. CW69-1/43F. Publ. en 1980.
N° 44
Études écologiques des populations d'ours blancs dans le sud-est de l'île Baffin, par Ian Stirling, Wendy Calvert et Dennis Andriashek. Also available in English.
N° de cat. CW69-1/44F. Publ. en 1980.
N° 45
Les polynies dans l'Arctique canadien, par Ian Stirling et Holly Cleator (rédacteurs). Also available in English.
N° de cat. CW69-1/45F. Publ. en 1981.
N° 46
Les Petites Oies blanches de l'est de l'Arctique canadien, par H. Boyd, G.E.J. Smith et F.G. Cooch. Also available in English.
N° de cat. CW69-1/46F. Publ. en 1982.
N° 47
Répartition et abondance des phoques dans la partie orientale de la mer de Beaufort, 1974–1979, par Ian Stirling, Michael Kingsley et Wendy Calvert. Also available in English.
N° de cat. CW69-1/47F. Publ. en 1983.
N° 48
Le comportement alimentaire du caribou de Peary selon les conditions de la neige et de la glace au printemps, par F.L. Miller, E.J. Edmonds et A. Gunn. Also available in English.
N° de cat. CW69-1/48F. Publ. en 1983.
N° 49
Étude de quelques techniques importantes d'échantillonnage de la faune, par A.R. Sen. Also available in English.
N° de cat. CW69-1/49F. Publ. en 1983.
N° 50
Réglementation intensive de la chasse aux canards en Amérique du Nord : but et réalisations, par Hugh Boyd. Also available in English
N° de cat. CW69-1/50F. Publ. en 1983.
N° 51
Dimension humaine de la chasse aux oiseaux-gibier migrateurs au Canada, par Fernand L. Filion et Shane A.D. Parker. Also available in English.
N° de cat. CW69-1/51F. Publ. en 1984.
N° 52
Éléments de la mortalité attribuable à la chasse chez le canard, par G.S. Hochbaum et C.J. Walters. Also available in English.
English.
N° de cat. CW69-1/52F. Publ. en 1984.